

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

EDUARDO MARTINS BATISTA

BOMBAS OPERANDO COMO TURBINAS:

Uma alternativa para geração de energia em redes de distribuição de água

São Leopoldo

2021

EDUARDO MARTINS BATISTA

BOMBAS OPERANDO COMO TURBINAS:

Uma alternativa para geração de energia em redes de distribuição de água

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan

São Leopoldo

2021

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e a toda a minha família, pelo apoio e pela confiança ao longo de toda a minha vida acadêmica e, principalmente, durante a elaboração deste trabalho.

Ao meu orientador, que, prontamente, mostrou-se atento as minhas dúvidas e contribuiu com a sua vasta experiência no assunto.

Aos meus colegas de trabalho, que, além de contribuírem com a experiência profissional, auxiliaram com a conciliação da rotina de trabalho com a vida acadêmica.

Aos meus amigos e colegas de curso, que me apoiaram e aconselharam durante a elaboração deste trabalho.

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é analisar a viabilidade técnica da aplicação de bombas operando como turbinas (BOT) como alternativa para a redução de pressão nas redes urbanas de distribuição de água e o aproveitamento de sua potência mecânica para produção de energia elétrica de forma limpa. Para isso, os dados obtidos em redes reais de abastecimento foram utilizados para aplicar estes métodos, simular as condições de operação através do *software* EPANET e, por fim, analisar os dados obtidos em dezoito casos com pressões e vazões distintas. Ao executar o método em sua forma original, para seleção de bombas operando como turbinas em fontes de água ininterruptas, apenas 33,33%, ou seja, seis casos, resultaram em uma seleção viável. Porém, com a diminuição da altura líquida ao se realizar a seleção dos equipamentos, a taxa de aplicabilidade do método subiu para 94,44%, sendo utilizável em dezessete dos dezoito casos analisados. A geração de energia em redes de maior vazão e com grande redução de pressão se mostrou promissora. Na seleção feita para uma rede com vazão máxima de 93 litros por segundo e uma diferença de pressão possível de 60 mca, a BOT é capaz de gerar 600 kWh durante um dia de operação. Entretanto, em redes com menor vazão e pouca diferença de pressão, a produção tende a ser pequena se comparada a outros métodos de geração de energia. Porém, devido a aplicação ser possível na grande maioria dos municípios e que, em cada um deles, podem ser instalados inúmeros equipamentos, o potencial de geração de energia utilizando este método é bastante relevante. Este resultado é promissor, pois o equipamento realiza a diminuição de pressão necessária na rede e ainda pode diminuir os custos com energia das companhias de saneamento. Em efeito de comparação, a energia que seria produzida pelos equipamentos simulados nesse estudo foi somada. Caso implementado, o sistema seria capaz de gerar 1.762 kWh durante um dia de operação. Este valor é levemente superior aos 1.650 kWh utilizados para a captação de água para uma cidade com, aproximadamente, 18.000 economias ativas e próxima de 45.000 habitantes. Portanto, os resultados apontam que o método pode ser utilizado, desde que observadas algumas alterações, para seleção de equipamentos que irão atuar sem comprometer o abastecimento da população, possibilitando, assim, a diminuição de pressão na rede de abastecimento e geração de energia elétrica limpa para abater os custos de captação, tratamento e distribuição de água.

Palavras-chave: Redução de pressão. Bombas operando como turbinas. Geração de energia elétrica. Redes de distribuição de água.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bomba operando como bomba.....	14
Figura 2 – Bomba funcionando como turbina.....	14
Figura 3 - Coeficientes de altura e vazão	17
Figura 4 – Comparação de curvas de altura e vazão.	19
Figura 5 – Fator de correção para seleção de motores.....	20
Figura 6 – Fator de vazão por horário.....	23
Figura 7 – Configuração da rede existente no ambiente de simulação	26
Figura 8 - Configuração da rede no ambiente de simulação com a BOT.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de redes a serem utilizados nas simulações	25
Tabela 2 – Vazões nominais das redes.....	29
Tabela 3 – Variação da vazão ao longo do dia no Caso 1.....	30
Tabela 4 – Dados para a seleção de bombas para o caso 1	31
Tabela 5 – Ponto de operação ideal da bomba para operar nesta condição	31
Tabela 6 – Bombas centrífugas selecionadas.....	32
Tabela 7 – Simulação do caso 1 para a seleção com vazão máxima	32
Tabela 8 - Simulação do caso 1 para a seleção com vazão mínima	34
Tabela 9 - Simulação do caso 1 para a seleção com vazão média.....	35
Tabela 10 – Potência disponível no eixo para o caso 1	36
Tabela 11 – Potências obtidas no caso 1	37
Tabela 12 – Resultados para a seleção utilizando a vazão máxima.....	39
Tabela 13 - Resultados para a seleção utilizando vazão mínima	40
Tabela 14 - Resultados para a seleção utilizando vazão média	40
Tabela 15 – Adequação da pressão para metade da altura disponível	42
Tabela 16 – Resultados para a vazão máxima e 50% da altura líquida.....	43
Tabela 17 - Resultados para a vazão mínima e 50% da altura líquida.....	44
Tabela 18 - Resultados para a vazão média e 50% da altura líquida	45
Tabela 19 – Melhores seleções em relação a produção de energia	47

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGERGS	Agência Estadual de Regulação dos Serviços Públicos Delegados do Rio Grande do Sul
ANA	Agência Nacional de Águas
BEP	<i>Best Efficiency Point</i>
BOT	Bomba Operando como Turbina
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
DECOPE	Departamento de Controle de Operações
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
GPV	<i>General Purpose Valve</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
RNF	Reservatório de Nível Fixo
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
VRP	Válvula Reguladora de Pressão

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
H_b	Altura da bomba a ser utilizada como turbina [m]
H_{ob}	Altura da bomba para seleção em catálogos [m]
H_t	Altura disponível na turbina [m]
k_1	Coefficiente de vazão diária [1]
k_2	Coefficiente de vazão horária [1]
k_a	Coefficiente de ajuste de altura [1]
k_q	Coefficiente de ajuste de vazão [1]
N_b	Rotação de trabalho da bomba [1/s]
N_{esp}	Rotação Específica [1]
N_t	Rotação da Turbina [1/s]
P_{cons}	Número de pessoas atendidas pela rede [1]
P_{et}	Potência gerada no eixo da BOT [kW]
P_{et}/P_n	Coefficiente experimental de ajuste de potência [1]
P_n	Potência nominal do motor [kW]
q	Consumo per capta por dia [L/s]
Q_b	Vazão da bomba a ser utilizada como turbina [m ³ /s]
Q_{ob}	Vazão da bomba para seleção em catálogos [m ³ /s]
Q_p	Vazão de projeto da Rede [L/s]
Q_t	Vazão da Turbina [m ³ /s]
η_b	Rendimento do equipamento operando como bomba [%]
η_t	Rendimento do equipamento operando como turbina [%]
ρ	Massa Especifica da Água [kg/m ³]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivos	11
1.1.1 Objetivo geral.....	11
1.1.2 Objetivos específicos.....	11
1.2 Justificativa	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 Bombas operando como turbinas	13
2.2 Método de seleção	15
2.3 Diminuição de pressão estabelecida pela BOT	18
2.4 Geradores de energia	19
2.5 Simulação	21
2.6 Projeção de consumo	22
3 METODOLOGIA	24
3.1 Projeção de dados para as simulações	24
3.2 Dimensionamento e seleção de equipamentos	26
3.3 Simulação do comportamento da BOT	27
3.4 Processamento de dados e cálculos para análise	28
4 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	29
4.1 Demonstração de resultados para o primeiro caso	29
4.2 Resultados obtidos para os demais casos	38
4.3 Resultados obtidos para dimensionamento com metade da altura líquida	42
4.4 Comparação entre os métodos de seleção	46
5 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

O consumo de água tratada é sinônimo de saúde para a população e deve ser disponibilizada em quantidade e qualidade suficientes para reduzir os riscos à saúde e manter o seu bem-estar. (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2005). A distribuição de água potável, segundo o IBGE (2017), está disponível para 85,5% da população brasileira. Atualmente, está em vigor a Lei 14.026, que estabelece um novo marco regulatório para o saneamento no Brasil. Esta regulamentação objetiva atender 99% da população até dezembro de 2033. Isto mostra o quanto este sistema está em pleno desenvolvimento e deve ter uma ampliação significativa nos próximos anos.

O tratamento e a distribuição de água são regulados por diversas entidades no Brasil, como a Agência Nacional de Águas (ANA), a Agência Estadual de Regulação dos Serviços Públicos Delegados do Rio Grande do Sul (AGERGS), entre outras em todo o território nacional. São inúmeras as regras exigidas para a excelência no atendimento da população, uma, em especial, motivou este estudo: a pressão de serviço. Este item é estabelecido pela norma NBR-12218, elaborado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), onde se estipula que a pressão estática disponibilizada para os consumidores deve estar entre 10 e 40 mca (metros de coluna d'água), podendo chegar a 50 mca em regiões onde o terreno possui grande desnível. Em cidades em que a topografia apresenta relevos acentuados, há um aumento significativo de pressão devido aos efeitos da gravidade aplicados ao fluido. Segundo Pugliese (2017), a maior causa de perdas nas redes de distribuição é a pressão elevada no sistema, que causa uma enorme tensão interna nas tubulações e acessórios da rede, provocando assim vazamentos ao longo do tempo. Segundo Graff (2019), o excesso de pressão motiva um aumento na vibração causada pelo deslocamento da água, o que leva a um aumento da quantidade de água perdida nos vazamentos. Por estes motivos, é fundamental realizar a diminuição da pressão nas redes de abastecimento. Usualmente, as empresas utilizam equipamentos reguladores, sendo o método das Válvulas Reguladoras de Pressão (VRP) o mais utilizado. Este dispositivo recorre de uma parte da pressão a jusante para bloquear a passagem de água, resultando na diminuição desejada a montante da válvula. Contudo, a pressão adquirida pelo fluido é anulada pelo equipamento, podendo ser considerado um desperdício de energia.

Segundo Giugni, Fontana e Portolano (2009), um dos métodos em estudo para reduzir a pressão da água e, simultaneamente, produzir trabalho, é a utilização de turbinas ou de bombas operando como turbinas (BOT). Conforme relata De Marchis *et al.* (2014), aliados a um gerador, estes equipamentos podem gerar energia elétrica como uma forma de aproveitamento,

colaborando muito para abater custos de produção e se, utilizados em larga escala, podem ter grande contribuição para a produção de energia. Este auxílio na produção de energia é importante, pois para realizar a captação, o tratamento e a distribuição de água, em todos os países, são consumidos cerca de três por cento da energia elétrica produzida mundialmente.

De acordo com Viana e Nogueira (2002), em aplicações de baixa produção de energia em rios e córregos, diversos países já utilizam BOT em detrimento das turbinas Pelton, Hélice e Francis. Isto se explica devido ao bom funcionamento das bombas centrífugas para geração de energia e o baixo custo em comparação com as turbinas de tamanho equivalente. Em um estudo, Giugni, Fontana e Portolano (2009) utilizaram a rede de distribuição de água de Nápoles, na Itália, para diversas simulações de utilização de VRPs e BOTs buscando entender a melhor maneira de otimizar a performance do sistema de abastecimento. Já Pugliese (2017), elaborou um estudo para comparar os resultados simulados computacionalmente e os resultados experimentais obtidos na utilização de bombas como turbinas, ampliando desta forma o campo de estudos sobre o assunto.

Entretanto, poucos trabalhos abordam a utilização de BOTs em redes de distribuição de água com ênfase na análise dos efeitos deste uso no comportamento da rede. Isto é fundamental, já que a principal função de um sistema de abastecimento é atender o consumo de água pela população. Assim, este trabalho irá se dedicar a aplicar os métodos conhecidos para seleção de bombas operando como turbinas em diferentes situações de abastecimento. O objetivo é verificar se as metodologias podem ser utilizadas para redes de distribuição, já que os parâmetros de vazão e de pressão não podem ser alterados neste caso. Para isso, serão realizadas simulações computacionais a fim de verificar se, além de gerar energia e diminuir a pressão da rede, o equipamento mantém as condições de abastecimento necessárias para atender os consumidores.

Para conduzir esse estudo, o presente trabalho está dividido em cinco capítulos. Inicialmente, a introdução, onde é apresentada a contextualização do estudo, os objetivos a serem alcançados e a justificativa. A fundamentação teórica é apresentada, a seguir, com pesquisas sobre a utilização de bombas operando como turbinas, métodos de seleção, teorias sobre a diminuição de pressão na rede causada pelas BOTs, teorias sobre geradores de energia elétrica, informações sobre as simulações computacionais e os métodos de cálculos utilizados para projeção de consumo em redes de água. Em seguida, o terceiro capítulo traz a metodologia desenvolvida, expondo os métodos utilizados para a coleta e a projeção de dados, para o dimensionamento e a seleção dos equipamentos, da simulação e do processamento de dados obtidos. As análises serão apresentadas no quarto capítulo, em conjunto com os resultados

obtidos. Para o encerramento do trabalho, o capítulo final mostra as conclusões do trabalho, seguido das referências bibliográficas utilizadas durante a elaboração deste estudo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal desse trabalho é analisar a viabilidade técnica da aplicação de bombas operando como turbinas (BOT) como alternativa para a redução de pressão nas redes urbanas de distribuição de água e o aproveitamento de sua potência mecânica para produção de energia elétrica de forma limpa.

1.1.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos desse trabalho destacam-se:

- a) avaliar as condições atuais de operação de redes de distribuição de água através da coleta e da organização de dados;
- b) aplicar o método de seleção já existente para bombas operarem como turbinas em diferentes cenários de pressão e de vazão, fornecendo dados de operação para análise;
- c) simular o funcionamento do sistema utilizando o *software* EPANET, buscando entender o comportamento dos equipamentos durante a operação com variação de vazão horária característica de redes de distribuição de água tratada.

1.2 Justificativa

O presente trabalho busca avaliar a utilização de bombas operando como turbinas (BOT) tendo em vista uma alternativa para redução de pressão em redes de distribuição de água. A aplicação deste equipamento está além da adequação da pressão na rede, permiti ser aliada à geração de energia elétrica, através do aproveitamento das energias cinética e potencial adquiridas pela água em tubulações instaladas em desníveis geográficos.

Inicialmente, deve-se buscar informações sobre diferentes situações de abastecimento em redes reais e as teorias envolvendo o dimensionamento e o consumo de água pela população. A partir destas informações é que serão realizados os dimensionamentos, as simulações e as análises quanto à viabilidade da aplicação. Como o objetivo final das redes é realizar o abastecimento de água para a população, estes dados serão imutáveis, por isso, é fundamental

avaliar as condições de operação nas redes de distribuição, que serão utilizadas como fonte de dados para este estudo.

Para cada situação escolhida, serão aplicados os métodos de seleção já existentes objetivando a escolha de bombas para operarem como turbinas. Mesmo que o foco de utilização em córregos ou fontes de água ininterruptas, pretende-se avaliar se estes métodos podem ser aplicados a redes de distribuição de água, já que estas apresentam uma grande variação de vazão ao longo do dia. Estas oscilações ocorrem devido ao consumo de água pela população e será importante entender o comportamento do sistema em uma operação com vazão variável.

Através da simulação computacional, todos os dados obtidos podem ser analisados de forma similar à realidade. Com estes dados deve-se compreender em que circunstâncias o sistema é mais eficiente e pode ser empregado, além de estabelecer as condições mínimas de operação para dar segmento ao atendimento da população. Outra vantagem é a agilidade na execução dos experimentos, possibilitando a obtenção de um número maior de dados devido a grande quantidade de simulações possíveis. Além disso, a utilização da simulação torna o trabalho menos oneroso e mais aplicável do que se executar os testes de forma prática, visto que a implementação de um sistema real é complexa e que, sem análises preliminares, pode comprometer o acesso a água de diversas pessoas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentadas pesquisas referentes aos temas bases para a execução da metodologia e das análises deste trabalho. Para isso, serão trazidas informações sobre o conceito de bombas operando como turbinas, os seus principais métodos de seleção, informações sobre a perda de pressão causada pelo equipamento, informações pertinentes à seleção de geradores de energia elétrica, programas e métodos disponíveis para a simulação computacional e, por fim, os métodos utilizados para a projeção de consumo de água da população e seus efeitos nas redes de distribuição.

2.1 Bombas operando como turbinas

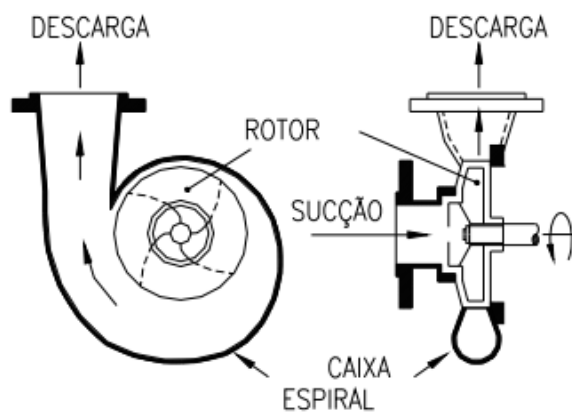
De acordo com Buona *et al.* (2015), realizar a escolha e o dimensionamento de uma bomba comercial para operar como turbina não é uma tarefa simples. Segundo os autores, dificilmente são encontradas informações do fabricante do equipamento sobre as condições de operação no modo reverso, portanto, a seleção deve ser feita a partir de pesquisas e de modelos de predição baseados em análises geométricas, teóricas e experimentais.

Para bombas centrífugas tradicionais operarem como turbinas, o sentido do escoamento deve ser invertido e, conseqüentemente, o sentido de rotação do impelidor e do eixo de transmissão ficam, também, em sentido contrário. Como pode se observar na Figura 1, uma bomba centrífuga operando em sentido convencional, o fluido entra no equipamento, por meio da sucção, com baixa pressão e, através do movimento realizado pelo impelidor, sai, pela descarga, acelerado, causando aumento de pressão conforme a rede é preenchida de água. No caso da utilização da bomba como turbina, como mostrado na Figura 2, o fluido entra com maior velocidade e pressão através da descarga, gerando um movimento de rotação no impelidor e saindo pela sucção da bomba. (VIANA; NOGUEIRA, 2002).

Segundo Chapallaz, Eichenberg e Fischer (1992), a utilização de BOTs apresenta diversas vantagens frente à utilização de turbinas convencionais: o menor custo de aquisição, manutenção mais simples, devido a ampla disponibilidade de peças sobressalentes e prestadores de serviço, ampla gama de modelos disponíveis, obtendo, assim, uma grande variedade de vazões e pressões e a fácil instalação devido a padronização de acessórios e conexões. Porém, de acordo com Dai *et al.* (2020), o impelidor das bombas centrífugas não foi projetado para a utilização no modo reverso, acarretando uma significativa perda em relação à turbina com uma redução na eficiência de 2% a 8,5% em relação ao ponto de melhor eficiência (BEP). O motivo

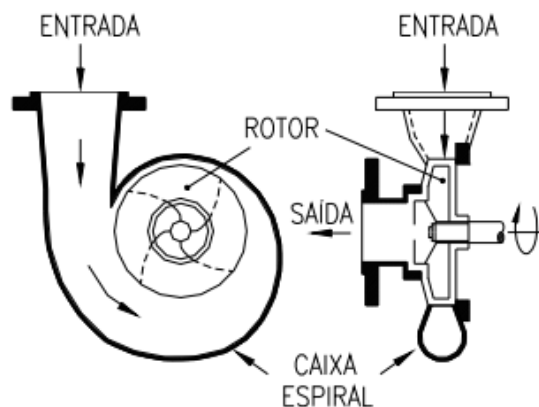
desta perda, segundo Viana (2012), são os ângulos construtivos das pás, que são projetados para obter uma melhor performance na operação como bomba e acabam não ficando adequados ao novo sentido de fluxo, acarretando o choque entre o fluxo de água e as pás do rotor. Para amenizar este fato, é possível realizar algumas modificações no impelidor das BOTs. Segundo sugere Chapallaz, Eichenberg e Fischer (1992), o abaulamento das pás pode ser uma alternativa para melhorar a performance no modo de operação como turbina.

Figura 1 – Bomba operando como bomba



Fonte: Viana e Nogueira (2002).

Figura 2 – Bomba funcionando como turbina



Fonte: Viana e Nogueira (2002).

Segundo o Departamento de Energia das Filipinas (2009), em operações abaixo de 60 L/s e altura de até 200 m, a bomba operando como turbina apresentaria maiores vantagens em termos de custos e de simplicidade de instalação. Uma turbina de fluxo cruzado teria dimensões muito maiores, apresentando uma velocidade de operação mais baixa e, assim, necessitaria de um sistema de transmissão para alimentar o gerador. Uma turbina Pelton, embora seja mais

flexível para funcionar em variações de vazão, apresentaria um valor elevado de fabricação devido a construção complicada para os bicos, já que exigiria três ou quatro jatos para uma boa operação. Turbinas Francis também poderiam ser instaladas nessas condições, porém, tem um alto custo de aquisição entre as opções disponíveis.

Como não é uma aplicação convencional, uma análise prévia deve garantir várias condições: escolha de bomba adequada, pressão suficiente na rede e proteções nas tubulações e instalações, devido a possíveis golpes de aríete durante a operação (GIUGNI; FONTANA; PORTOLANO, 2009). Segundo Fronsina, Buono e Senatore (2017), diversos estudos foram conduzidos nos últimos 90 anos, buscando entender seu funcionamento de maneira teórica e prática e seguem sendo conduzidos ainda hoje, com diversas pesquisas envolvendo simulações computacionais. De acordo com Custódio *et al.* (2018), o uso de BOTs se mostrou viável em comparação com a instalação de sistemas de eletrificação rural em Minas Gerais. Conforme a conclusão do estudo, a utilização de bomba operando como turbina, juntamente com um gerador de indução e um conversor de frequência para padronizar a energia produzida, pode pagar o investimento em instalação e a aquisição de equipamentos em cerca de dois anos. No estudo conduzido por Giugni, Fontana e Portolano (2009), foram realizadas simulações computacionais para verificar a possibilidade de substituição de VRPs por BOTs em um setor da rede de distribuição no município de Nápoles, Itália. De acordo com as análises, a substituição é viável em uma rede de distribuição de água, aliando o controle de pressão com a geração de energia. Nos cenários analisados, a produção de energia variou entre 418 kWh até 821,6 kWh em um dia com a combinação de três equipamentos. Esta pesquisa ainda aponta, através de uma análise econômica preliminar, que a redução nos custos com vazamentos, aliados a economia através da geração de energia, torna o investimento bastante atrativo, pois o retorno do valor investido se dará em poucos anos.

2.2 Método de seleção

De acordo com Fronsina, Buono e Senatore (2017), as primeiras publicações com a utilização do ponto de melhor eficiência iniciaram em 1962, com Childs, que apresentou um método de seleção através da eficiência da bomba. Estudos similares foram aprestados por McClaskey e Lundquist, em 1976, e por Lueneburg e Nelson, em 1985. Já Grover, em 1980, e Hergt, no ano de 1994, apresentaram métodos baseados na velocidade específica no modo turbina. De acordo com Medeiros (2004), os primeiros estudos no Brasil foram conduzidos por Viana, em 1987, e por Nogueira, em 1990. Ambos utilizavam métodos similares através da

aproximação das curvas características das bombas comerciais para prever a operação como turbina. Ao longo dos anos, diversas análises comparativas surgiram, como a apresentada por Frosina, Buono e Senatore (2017). Ela traz uma comparação de uma grande quantidade destas teorias com análises fluidodinâmicas computacionais. Nela, pode-se perceber que a grande maioria dos métodos são semelhantes, tendo como principal diferença os coeficientes de ajustes obtidos. Esta variação está amplamente ligada às diversas formas, tamanhos e configurações encontradas em bombas centrífugas comerciais. A maioria dos resultados encontrados estão subestimados ou superdimensionados em, aproximadamente, 10% do real ponto de eficiência de uma bomba operando como turbina. Como afirmam Kramer, Terheiden e Wieprecht (2018), os cálculos servem para realizar um dimensionamento aproximado das bombas como turbinas, mas, que antes de ser realizada a aplicação física do conceito, a bomba a ser utilizada deve ser testada fisicamente para confirmar os valores obtidos na simulação.

Segundo Viana e Nogueira (2002), uma bomba requer maior altura e vazão para operar como turbina com o mesmo rendimento da operação normal. Para se estabelecer um método de seleção, foi proposta a utilização de coeficientes de ajuste para cada um destes fatores. Inicialmente, se deve encontrar a rotação específica da BOT, através da Equação (1). Segundo os autores, deve se considerar 1800 ou 3600 rpm como rotação da turbina, pois este é o valor de rotação nominal para os geradores elétricos.

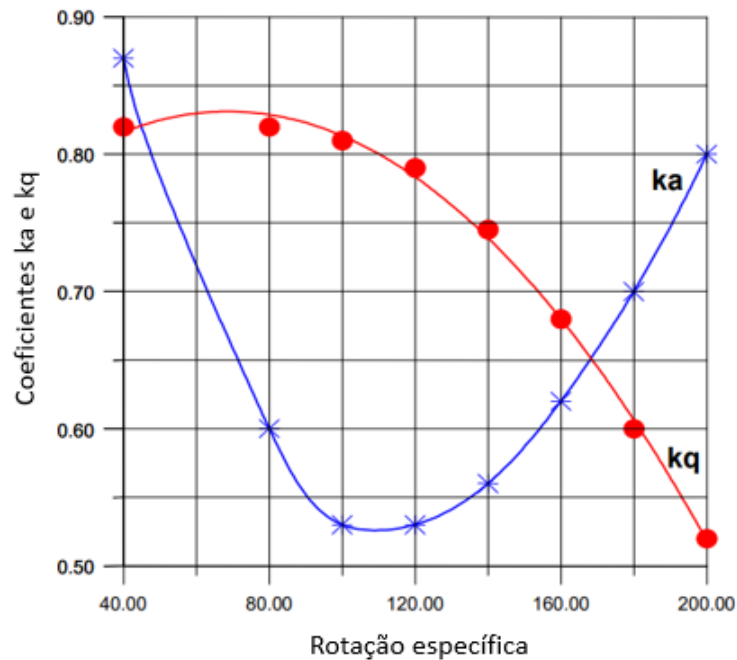
$$N_{esp} = \frac{N_t \sqrt{Q_t}}{\sqrt[4]{(gH_t)^3}} 10^3 \quad (1)$$

onde N_{esp} é a rotação específica; N_t é a rotação da turbina, Q_t é a vazão do fluido, g é a aceleração da gravidade e H_t é a altura disponível na entrada da BOT.

Cabe ressaltar que, de acordo com a pesquisa de Viana (2012), a altura disponível que deve ser incluída nos cálculos é a altura líquida, ou seja, deve se diminuir da altura disponível o valor necessário para a chegada de água ao retorno do manancial de origem. Este fator é importante, também, para evitar os efeitos de cavitação, que podem estar presentes caso a diferença de pressão seja muito grande entre a entrada e a saída do equipamento.

Ao se obter a rotação específica, deve se consultar o gráfico mostrado na Figura 3, para obter os coeficientes de altura (k_a) e de vazão (k_q).

Figura 3 - Coeficientes de altura e vazão



Fonte: Viana e Nogueira (2002).

Posteriormente, utilizam-se os fatores correspondentes para se encontrar a altura e a vazão a serem buscados nas curvas de bombas convencionais. Utilizando-se da Equação (2), se encontra o valor de referência para a altura da bomba a ser utilizada. Na Equação (3), observa-se que ao utilizar a vazão real na turbina multiplicada pelo coeficiente de vazão, se encontra o valor comercial requerido para a bomba a ser utilizada.

$$H_b = H_t k_a \quad (2)$$

$$Q_b = Q_t k_q \quad (3)$$

onde H_b é a altura de bomba a ser utilizada como turbina, H_t é a altura disponível onde será instalada a turbina, Q_b é a vazão da bomba a ser utilizada como turbina e Q_t é a vazão disponível onde será instalada a turbina.

Como a rotação a ser utilizada na turbina é maior do que usualmente é empregada na operação tradicional, os valores de altura e de vazão devem ser ajustados de acordo com as Leis de Semelhança. Assim, se utilizam as Equações (4) e (5) para obter os valores a serem buscados no mercado ao se adquirir uma bomba para ser utilizada como turbina.

$$H_{ob} = \left(\frac{N_b}{N_t}\right)^2 H_b \quad (4)$$

$$Q_{ob} = \frac{N_b}{N_t} Q_b \quad (5)$$

onde H_b é a altura de bomba na rotação da turbina, H_{ob} é a altura a ser buscada em catálogos, N_b é a rotação da bomba em catálogo, N_t é a rotação da bomba quando utilizada como turbina, Q_b é a vazão da bomba na rotação da turbina e Q_{ob} é a vazão a ser buscada em catálogos.

Segundo Medeiros (2004), outro fator importante a ser analisado em uma BOT é a potência gerada no eixo da bomba. Através dela é que será possível realizar o dimensionamento de um gerador de eletricidade apropriado. De acordo com Fronsina, Buono e Senatore (2017), a potência pode ser calculada através da Equação (6).

$$P_{et} = \rho g Q_t H_t \eta_t \quad (6)$$

onde P_{et} é a potência do eixo, ρ é a massa específica da água, g é a aceleração da gravidade, Q_t é a vazão do fluido na turbina, H_t é a pressão na entrada da turbina e η_t é o rendimento do equipamento operando como turbina.

2.3 Diminuição de pressão estabelecida pela BOT

A queda de pressão na rede, proporcionada pela BOT, é um dado muito relevante, principalmente para a aplicação em redes de distribuição de água. Através deste parâmetro se verifica a viabilidade de instalação em determinados locais, já que a rede à montante da BOT deve ter uma pressão de abastecimento mínima estabelecida em norma.

Segundo Kramer, Terheiden e Wieprecht (2018), o impelidor de uma bomba tem os canais das pás mais longos e, por isso, a quantidade de energia de pressão convertida é maior, enquanto converte menos quantidade de energia cinética. De acordo com Giugni, Fontana e Portolano (2009), a diminuição da pressão pode ser aproximada através de simulação computacional. Isto pode ser feito através das adequações das curvas características do equipamento para as características operando como BOT. A adequação deve ser feita para a vazão e a pressão levando em conta a eficiência do equipamento, conforme as Equações (7) e (8).

$$Q_t = \frac{Q_b}{\eta_b^{0,8}} \quad (7)$$

$$H_t = \frac{H_b}{\eta_b^{0,8}} \quad (8)$$

onde Q_t é a vazão corrigida para operar como turbina, Q_b é a vazão operando como bomba, η_b é a eficiência de operação da bomba, H_t é a altura corrigida para operar como turbina e H_b é a altura funcionando como bomba.

Em seguida, deve ser feita a adequação entre a rotação de trabalho da bomba e da turbina, que necessita operar em rotação próxima à rotação síncrona do gerador, conforme as Equações (9) e (10).

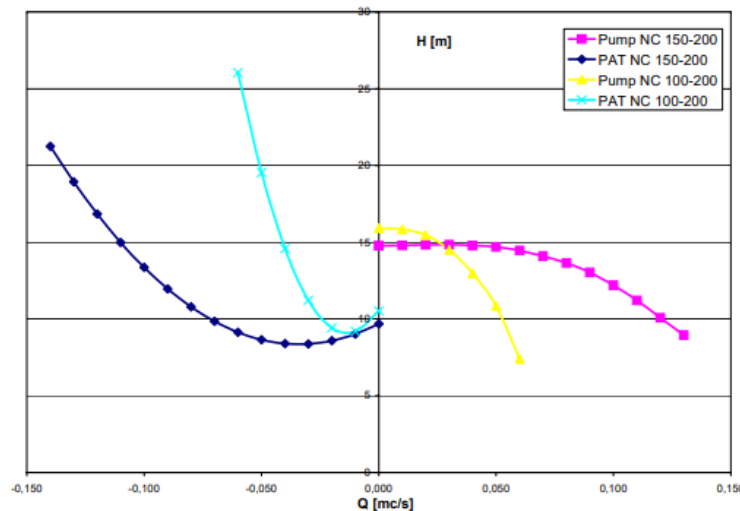
$$Q_t = Q_b \frac{N_t}{N_b} \quad (9)$$

$$H_t = H_b \frac{N_t}{N_b} \quad (10)$$

onde Q_t é a vazão corrigida para operar como turbina, Q_b é a vazão operando como bomba, N_t é a rotação de operação como turbina, N_b é a rotação de operação nominal da bomba, H_t é a altura corrigida para operar como turbina e H_b é a altura funcionando como bomba.

Como o fluxo através da BOT é oposto ao da operação tradicional da bomba, pode se considerar como negativos os fluxos que passam através da turbina, como mostrado na Figura 4. Estas novas curvas podem ser inseridas no *software* de simulação, utilizando uma válvula de controle genérica para tornar a simulação viável.

Figura 4 – Comparação de curvas de altura e vazão



Fonte: Giugni, Fontana e Portolano (2009).

2.4 Geradores de energia

Segundo Gattulli, Brandão e Edo, (2018), para se gerar energia através do movimento mecânico da bomba é necessário que se acople um gerador de energia ao sistema. Assim, o

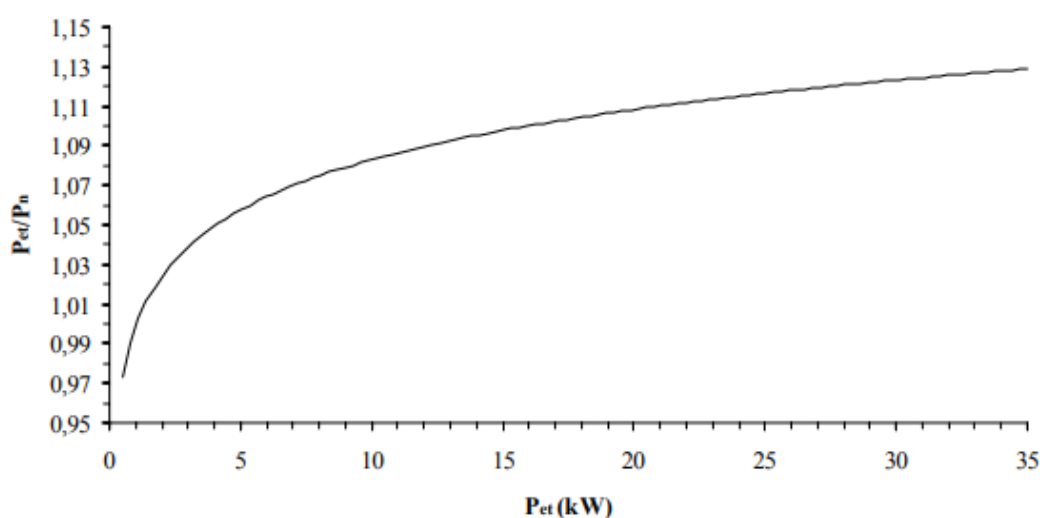
torque e a velocidade são transmitidos pelo eixo do gerador para produzir energia em suas bobinas internas através do movimento do rotor.

Existem dois principais tipos de geradores em utilização atualmente: os síncronos e os assíncronos. Os geradores síncronos são, geralmente, aplicados em instalações de turbogeradores. Já os assíncronos, ou de indução, são mais empregados em parques eólicos, usinas termoeletricas e hidroelétricas de pequeno e médio porte. (FREITAS *et al.*, 2005).

Segundo Guarabira e Aguiar (2018), as máquinas síncronas apresentam sincronismo entre a velocidade do rotor e a frequência da tensão principal. As assíncronas não possuem esse sincronismo, visto que a tensão e a corrente no rotor são induzidas nos seus enrolamentos, que são curtos-circuitados. Uma máquina de indução não dispõe de campo excitado por corrente contínua, como na máquina síncrona, e apresenta uma rotação diferente da síncrona, portanto, com escorregamento.

Para dimensionar o motor a ser utilizado como gerador, pode se utilizar o método de seleção proposto por Chapallaz, Eichenberg e Fischer (1992). Apesar de ser conduzido para máquinas de 50 Hz, a teoria se mostra confiável para motores de 60 Hz, como indica o estudo de Medeiros (2004). O primeiro passo é realizar a consulta do fator de correção para a seleção, na Figura 5, obtido através de diversos experimentos. Esta consulta é feita através da potência disponível no eixo da BOT, já calculada anteriormente. Com ela, se encontra o fator de ajuste para obter a potência correta do gerador.

Figura 5 – Fator de correção para seleção de motores



Fonte: Medeiros (2004).

Com o fator de correção já encontrado, pode-se utilizar a Equação (11) para determinar a potência nominal do motor. Esta potência deve ser utilizada como base para a seleção em catálogos do equipamento. Caso a potência teórica não seja encontrada em um equipamento disponível no mercado, deve ser utilizada o gerador com capacidade imediatamente superior.

$$P_n = \frac{P_{et}}{P_{et}/P_n} \quad (11)$$

onde P_n é a potência nominal do motor, P_{et} é a potência obtida no eixo da BOT e P_{et}/P_n é a relação experimental obtida através da Figura 5.

2.5 Simulação

Conforme afirma Silva, (2014), o uso de simulações hidráulicas nas redes de distribuição de água é fundamental para obter o controle eficiente dos sistemas. Elas podem ser utilizadas para o planejamento, o projeto, a operação e a manutenção dos sistemas. De acordo com Graff (2019), o *software* executa as simulações com os dados fornecidos através da resolução de equações de continuidade e energia. Assim, a confiabilidade dos resultados está diretamente associada à qualidade dos dados informados. Atualmente, existem diversos simuladores no mercado para esta finalidade, como o Epanet, Watercad, Hidrocad e Strumap, sendo que a escolha do programa a ser utilizado vai depender de qual tipo de projeto que será adotado.

Segundo Graff (2019) o EPANET foi elaborado pela *Environmental Protection Agency* (EPA), a agência governamental norte-americana responsável por proteger os recursos naturais, como a terra, o ar e os recursos hídricos. Nele, é possível realizar simulações estáticas e dinâmicas para conhecer o comportamento hidráulico em redes de distribuição e análises sobre a qualidade da água e perdas no sistema. Além de apresentar todas estas possibilidades, o programa apresenta dados bastante confiáveis, pois é bastante utilizado, testado e analisado. A sua versão em português foi uma iniciativa do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS), pertencente ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, do Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). (ROSSMAN, 2009).

Segundo Rossman (2009), pode-se utilizar o EPANET para realizar simulações estáticas e dinâmicas a fim de conhecer o comportamento hidráulico em redes de distribuição. Nestas redes, é possível inserir diversos itens, como: tubulações, bombas, válvulas e reservatórios, e, ainda, alterar propriedades físicas para uma simulação real. O programa disponibiliza o

acompanhamento dos valores da vazão em cada tubulação, da pressão em cada nó, da altura de água em cada reservatório e outras diversas informações.

2.6 Projeção de consumo

Segundo Graff (2019), como as redes de distribuição de água são responsáveis por conduzir a água até os locais de consumo, os dimensionamentos devem ser adequados para garantir o abastecimento de quem a consome de forma segura, tendo as pressões, a quantidade e a qualidade recomendadas por normativas.

De acordo com, uma das principais grandezas em uma rede de abastecimento é a sua vazão de operação. Ela pode ser compreendida como a quantidade de água necessária para atender a população em um determinado período. As redes apresentam variações de vazão e pressão em formas cíclicas. Isto ocorre devido a demanda estabelecida pelo consumo de água, sendo a vazão determinada pela utilização dos consumidores finais. Esta variação ocorre devido a diversos fatores. O primeiro deles é a temperatura, que eleva o consumo em dias mais quentes. Outro fator importante é o horário, já que pode haver picos de maior e menor consumo, sendo seu maior pico às doze horas e às dezoito horas e o menor durante a madrugada. A condição do tempo também contribui com a variação, já que em dias de sol existe uma tendência de haver maior consumo. (DANTAS; MACHADO, 2020)

De acordo com Silva, Guimarães e Carvalho (2007), a vazão de projeto de uma rede deve ser calculada através da Equação (12):

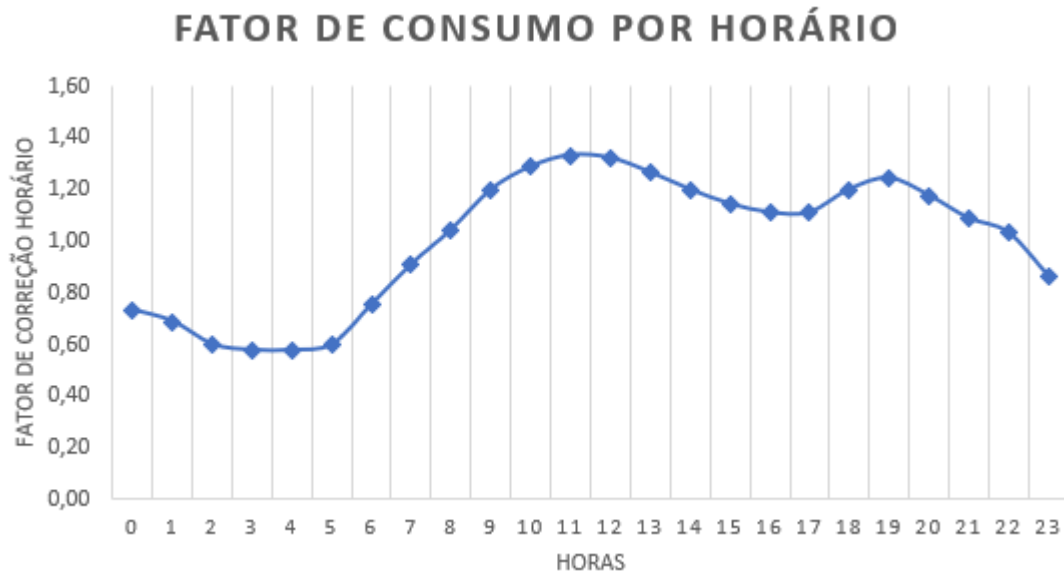
$$Q_p = \frac{P_{cons} q k_1 k_2}{86400} \quad (12)$$

onde Q_p é a vazão de projeto, P_{cons} é a população atendida pela rede, q é o consumo per capita durante um dia, k_1 é o coeficiente de vazão diária e k_2 é o coeficiente de vazão horária.

A CORSAN (2016), estabelece, através de suas diretrizes para ampliação de redes e novos loteamentos os parâmetros que devem ser considerados nos projetos. A vazão per capita deve ser 200 L por dia, considerando uma média de cinco habitantes por residência. Para os coeficientes de consumo, ela estabelece que k_1 deve ser igual a 1,2 e k_2 igual a 1,5, se obtendo assim vazões máximas de consumo, sem considerar possíveis variações.

Porém, o estudo de caso apresentado por Guidi (2016) monitorou por três anos a variação de consumo do município de Franca, no estado de São Paulo. Um dos objetivos do estudo era entender o padrão de consumo da população ao longo do dia. Com a compilação de dados de diversas redes, o estudo chegou à variação diária apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Fator de vazão por horário



Fonte: Guidi (2016)

Nela, pode-se observar os fatores de multiplicação a serem utilizados nos cálculos de vazão da rede em cada hora do dia, obtendo-se, assim, um dimensionamento mais preciso.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento deste estudo, com o propósito de atender todos os objetivos especificados anteriormente. Esta seção está dividida em quatro fases de desenvolvimento: (I) projeção de dados para as simulações, (II) dimensionamento e seleção de equipamentos, (III) simulação do comportamento da BOT e (IV) processamento de dados e cálculos para análise.

3.1 Projeção de dados para as simulações

Para dar início ao estudo, deve-se primeiramente selecionar os dados que serão analisados ao longo do trabalho. Como o objetivo é entender a viabilidade de utilização do método de seleção proposto por Viana e Nogueira (2002), os cálculos e as simulações foram realizados visando o maior número de situações possíveis. Assim, são utilizadas como base seis redes distintas, tal qual pode ser observado na Tabela 1. Os dados de economias atendidas e tamanho de tubulação foram obtidos segundo sistemas de abastecimento da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), através da base de dados do Departamento de Controle Operacional (DECOPE). Cada rede apresenta diferentes valores de economias atendidas, que é fundamental para determinar a vazão, e de diâmetro nominal da tubulação.

Além da vazão, outro fator importante para a análise é a pressão disponível em cada rede. Visto que cada local de abastecimento apresenta uma diferença de relevo e características únicas de abastecimento, houve uma grande diversidade de valores para a pressão disponível e para a pressão a ser entregue após a diminuição do equipamento. Para ser possível analisar a sua real influência no método de seleção, é preciso estabelecer uma forma de padronizar estes valores. Para cada rede foram propostas três variações distintas: baixa, média e alta diferença de pressão. Como o método utiliza a altura líquida disponível, a pressão de saída foi mantida igual para todas as situações. Nas redes com diferenças baixas de pressão, o valor de entrada definido foi de 40 mca, gerando 20 mca de pressão disponível. Já na diferença de pressão média, foi considerada a pressão inicial de 60 mca, o que resulta em um valor disponível de 40 mca. No último caso se considerou 80 mca na entrada da BOT, apresentando 60 mca de diferença com a pressão mínima de saída. Assim, foram realizados testes para dezoito casos, sendo três situações diferentes para cada rede estabelecida, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de redes a serem utilizados nas simulações

Caso	Rede	Economias	Diâmetro Nominal da Tubulação (mm)	Pressão de entrada (mca)	Pressão de saída (mca)
1	Rede 1	150	75	40	20
2	Rede 1	150	75	60	20
3	Rede 1	150	75	80	20
4	Rede 2	250	100	40	20
5	Rede 2	250	100	60	20
6	Rede 2	250	100	80	20
7	Rede 3	750	150	40	20
8	Rede 3	750	150	60	20
9	Rede 3	750	150	80	20
10	Rede 4	1250	200	40	20
11	Rede 4	1250	200	60	20
12	Rede 4	1250	200	80	20
13	Rede 5	2000	250	40	20
14	Rede 5	2000	250	60	20
15	Rede 5	2000	250	80	20
16	Rede 6	5000	300	40	20
17	Rede 6	5000	300	60	20
18	Rede 6	5000	300	80	20

Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, deve-se determinar a vazão necessária ao fornecimento de água para o número de economias atendidas em cada rede. Para isso, se utiliza o método adotado pela CORSAN (2016), mostrado na seção 2.6. Porém, como mencionado neste mesmo capítulo, há uma variação de consumo ao longo do dia. Como o objetivo é entender o comportamento da BOT em situações próximas à condição real, se utilizou um fator de consumo horário diferente do estabelecido pelo procedimento padrão. Isto é realizado, pois, a norma busca basear os projetos de acordo com as vazões máximas da rede que são atingidas em poucos horários. Logo, entende-se que o valor a ser utilizado deve ser nulo para que, posteriormente, nas simulações, o valor seja corrigido pelos fatores de consumos trazidos por Guidi (2016) e apresentados na Figura 6.

Pelos motivos apresentados, deverá ser realizada uma simulação inicial para cada um dos cenários, visando obter os valores de vazão e pressão ao longo do dia. A simulação computacional foi realizada com o *software* EPANET na sua versão 2.0, disponível, gratuitamente, no site do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

Como mostrado na Figura 7, a simulação será feita através de uma representação de rede simples. O primeiro item da rede é o reservatório de nível fixo (RNF). Ele é responsável pelo fornecimento de água para a rede na quantidade necessária e será atribuída a cota referente a respectiva pressão da rede. Os trechos 1 e 2 (T_1 e T_2) tem o diâmetro da rede original e um comprimento unitário. Isto implica que não houve a consideração de perda de carga. Esta consideração pode ser feita, pois, os trechos onde são realizadas as montagens para a instalação de VRPs são, em geral, curtos, gerando uma perda de carga por atrito desprezível em relação aos valores de operação do equipamento. Eles são inseridos na simulação para a ligação entre os elementos principais, logo, não exercem função de importância como consumo de água ou variação de pressão. Em seguida, é colocada uma Válvula Reguladora de Pressão (VRP), configurada de acordo com a pressão de saída desejada para cada caso. Como se optou por padronizar a pressão de saída, ela sempre reduzirá a pressão para 20 mca. O último componente é o nó 3 (N_3), que é o ponto onde o consumo de água será configurado. Neste local é estabelecido o valor de vazão necessário para o atendimento das economias ligadas às redes, calculado conforme a seção 2.5. Neste ponto o simulador aplicou a variação de vazão a cada hora, conforme os coeficientes horários mostrados na seção 2.6, gerando variações distintas ao longo do dia. É este o principal dado a ser obtido com a simulação e que servirá como base para a continuidade desta pesquisa. Entretanto, como os valores devem variar significativamente ao longo do dia e o método de seleção exige que seja elencada uma vazão padrão para o dimensionamento, optou-se por realizar a seleção em três condições distintas para cada caso: o primeiro, será com a vazão máxima obtida durante o dia; o segundo, com a vazão mínima e o último com a média das vazões obtidas ao longo do dia. Assim, será possível identificar a melhor maneira de aplicar o método para as condições de vazão variável. Portanto, serão aplicadas, neste trabalho, cinquenta e quatro seleções de equipamentos e análises para obtenção de diferentes dados de operação com condições diversas de pressão e vazão.

Figura 7 – Configuração da rede existente no ambiente de simulação



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Dimensionamento e seleção de equipamentos

A segunda etapa do trabalho é realizar a seleção de bombas para operar como turbinas, aplicando o método de seleção desenvolvido por Viana e Nogueira (2002), e que é mostrado na

seção 2.2. Com os dados de pressão e de vazão da rede no possível local de instalação da BOT, simulados e tabelados, pode-se iniciar os cálculos para encontrar um modelo de bomba no mercado. O primeiro passo é encontrar a rotação específica do equipamento através da Equação (1). Assim, pode-se obter os coeficientes de ajustes de pressão e de vazão, estabelecidos pela Figura 3. Em seguida, é possível utilizar a Equação (2) para encontrar a altura e a Equação (3) para determinar a vazão necessária do equipamento. Conforme afirma o estudo de Medeiros (2004), estes dados ainda devem ser adaptados para a diferença de rotação em que a turbina opera e a rotação especificada para a operação da bomba. Assim, se utilizam as Equações (4) e (5) para identificar os pontos de melhor eficiência a serem buscados nos catálogos de fabricantes. Serão realizados os cálculos para as velocidades de 1750 rpm e 3600 rpm, condições próximas às velocidades síncronas do gerador.

Para ter uma padronização nos testes, todos os equipamentos escolhidos para a obtenção de dados são do mesmo fabricante. A empresa escolhida foi a Schneider, através dos seus catálogos de bomba monobloco. Irá se buscar, no catálogo, equipamentos que trabalhem o mais próximo do ponto encontrado durante o dimensionamento. Com o tamanho de bomba selecionada, a tabela de vazão e de pressão fornecida pelo equipamento é copiada para uma planilha, onde serão ajustados para a operação como turbina. Outro dado importante a ser retirado do catálogo de fabricantes é a eficiência do equipamento no ponto de trabalho escolhido para ser utilizado no cálculo de potência obtida no eixo da bomba.

3.3 Simulação do comportamento da BOT

A simulação das redes com a utilização da BOT é fundamental para se observar o comportamento da vazão e da pressão na rede ao longo do dia. Através destes dados será possível calcular a potência gerada pelo equipamento e analisar a possibilidade de utilização do equipamento na rede. Se usará um sistema similar ao inicialmente mostrado na seção 3.1, incluindo um reservatório de nível fixo, uma VRP e o nó de consumo. O diferencial será a inclusão de uma válvula genérica (GPV), como pode ser observado na Figura 8, que fará o papel de BOT. Para isso, é incluída a curva de altura e pressão obtida durante o dimensionamento e que será responsável por determinar, para cada vazão, a quantidade de pressão que a BOT irá diminuir da pressão da linha.

Figura 8 - Configuração da rede no ambiente de simulação com a BOT



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Processamento de dados e cálculos para análise

A fim de continuar a análise, será extraído um relatório do *software* para cada uma das simulações nos nós N1 e N2, obtendo a pressão e a vazão em cada um deles. Assim, será possível comparar a pressão à montante e à jusante da BOT e verificar a perda de pressão provocada por ela, na rede, ao longo do dia. Juntamente com a vazão, esses dados serão importantes para o cálculo de potência gerada no eixo da bomba. Com eles, será possível determinar a potência disponível no eixo da bomba com a utilização da Equação (6).

De acordo com o método apresentado por Medeiros (2004), deve-se adequar a potência disponível no eixo para depois realizar a seleção de um motor que será usado como gerador. Essa adequação deve ser feita por meio da Equação (11), com um coeficiente de ajuste obtido através do gráfico mostrado na Figura 5 e com a maior potência gerada pela BOT. Com isso, será possível determinar o motor a ser utilizado em cada situação e sua eficiência. Para conhecer a potência gerada durante um dia de operação, todas as potências serão somadas e multiplicadas pela eficiência do motor selecionado.

4 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante as simulações e as análises realizadas utilizando a metodologia proposta. Inicialmente, serão apresentados os resultados obtidos na execução da metodologia para o primeiro caso proposto e, em seguida, somente o resultado obtido depois da simulação para os demais casos. Como a metodologia é aplicada, igualmente, em todos os casos, optou-se por trazer somente os resultados devido ao grande volume de dados gerados nas dezoito análises. Por fim, estes dados serão analisados para verificar se o emprego desses equipamentos é viável e, ainda, se o método de cálculo pode ser utilizado para a aplicação em redes de distribuição de água.

4.1 Demonstração de resultados para o primeiro caso

O primeiro cálculo realizado foi o da vazão de água necessária para o pleno fornecimento ao número de economias atendidas pela rede. Ao utilizar o método apresentado na seção 2.6 foram obtidos os resultados mostrados na Tabela 2. Pode se perceber que a seleção de redes feita abrange uma ampla variedade de vazões. Isto é importante para verificar a real influência da vazão no método e, ainda, se é possível a utilização em diversas redes.

Tabela 2 – Vazões nominais das redes

(continua)

Caso	Rede	Economias atendidas	Vazão (L/s)
1	Rede 1	150	2,08
2	Rede 1	150	2,08
3	Rede 1	150	2,08
4	Rede 2	250	3,47
5	Rede 2	250	3,47
6	Rede 2	250	3,47
7	Rede 3	750	10,42
8	Rede 3	750	10,42
9	Rede 3	750	10,42
10	Rede 4	1250	17,36
11	Rede 4	1250	17,36
12	Rede 4	1250	17,36
13	Rede 5	2000	27,78
14	Rede 5	2000	27,78

(conclusão)

Caso	Rede	Economias atendidas	Vazão (L/s)
15	Rede 5	2000	27,78
16	Rede 6	5000	69,44
17	Rede 6	5000	69,44
18	Rede 6	5000	69,44

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir destes dados foi feita a simulação com cada um dos casos para determinar a vazão e a pressão de cada rede ao longo de um dia. Como o reservatório fornece uma pressão constante de água e a perda de carga, no curto comprimento estabelecido, foi considerada desprezível, a pressão ficou inalterada. Já a vazão se comportou conforme o mostrado na seção 2.6 e, para exemplificação, o resultado pode ser observado na Tabela 3 para o primeiro caso. Conforme pode ser observado, há uma grande variação de vazão ao longo do dia devido ao consumo. Isto implica em uma ampla faixa de trabalho em que as bombas deverão operar, já que esta vazão é demandada pelo consumo e não pode ser regulada.

Tabela 3 – Variação da vazão ao longo do dia no Caso 1

(continua)

Hora	Pressão (m)	Vazão (L/s)
0:00	40	1,44
1:00	40	1,25
2:00	40	1,20
3:00	40	1,20
4:00	40	1,25
5:00	40	1,57
6:00	40	1,90
7:00	40	2,18
8:00	40	2,50
9:00	40	2,69
10:00	40	2,78
11:00	40	2,75
12:00	40	2,64
13:00	40	2,50
14:00	40	2,38
15:00	40	2,31
16:00	40	2,31

(conclusão)

Hora	Pressão (m)	Vazão (L/s)
17:00	40	2,50
18:00	40	2,59
19:00	40	2,45
20:00	40	2,27
21:00	40	2,15
22:00	40	1,81
23:00	40	1,53

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, a fim de encontrar a melhor forma de dimensionar uma bomba para operar como turbina, foram feitas três seleções para cada um dos casos. Serão utilizadas as vazões máxima, média e mínima para cada caso, conforme o exemplo, para o caso 1, mostrado na Tabela 4. Essa variação poderá confirmar qual o dado mais relevante para a seleção dos equipamentos, já que as redes apresentam grande variação de vazão ao longo do dia.

Tabela 4 – Dados para a seleção de bombas para o caso 1

Método	Pressão (mca)	Vazão (L/s)
Valor Máximo	20	2,78
Valor Mínimo	20	1,20
Média	20	2,09

Fonte: Elaborado pelo autor.

Estes dados foram utilizados no método de seleção proposto na seção 2.2 tendo em vista ajustar e encontrar os valores adequados para a busca de modelos de bombas a serem usadas como BOT. Os resultados são mostrados na Tabela 5 e devem ser utilizados para encontrar bombas que contenham valores próximos a este ponto de operação.

Tabela 5 – Ponto de operação ideal da bomba para operar nesta condição

	Seleção para Vazão Máxima	Seleção para Vazão Mínima	Seleção para Vazão Média
Altura (m)	12,81	16,01	13,90
Vazão (m³/h)	7,64	3,26	5,73

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao realizar a busca, em catálogos da fabricante *Schneider*, foi encontrada uma bomba centrífuga com o ponto de operação mais próximo possível. Assim, os modelos selecionados para o caso 1 são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Bombas centrífugas selecionadas

	Seleção para Vazão Máxima	Seleção para Vazão Mínima	Seleção para Vazão Média
Fabricante	Schneider	Schneider	Schneider
Modelo	BC-91 S/T	BC-91 S/T	BC-91 S/T
Potência (cv)	1	1/3	1/2
Rendimento	50%	50%	43%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Obtidas as curvas de operação para estes três equipamentos, foram feitas as correções destas para as curvas de operação das bombas como turbinas, utilizando o método trazido por Giuni, Fontana e Portolano (2009), conforme mostrado na seção 2.3. Estes dados foram incluídos no EPANET como a curva de perda de pressão estabelecida pelo equipamento. Ao executar a simulação, os dados de diminuição de pressão causada pela BOT e a pressão após o equipamento foram obtidos e representados na Tabela 7, para os valores de vazão máxima, na Tabela 8, para os valores de vazão mínima e na Tabela 9, para os valores de vazão média.

Analisando os dados mostrados na Tabela 07, pode-se perceber que a perda de pressão, que seria causada pela BOT para cada uma das vazões horárias, é maior que a pressão disponível na rede. Logo, o equipamento selecionado não pôde ser utilizado neste caso, pois iria prejudicar o abastecimento de água desta rede. Além disso, o equipamento não teria os valores mínimos de pressão disponível para a sua operação na rotação desejada.

Tabela 7 – Simulação do caso 1 para a seleção com vazão máxima

(continua)

Caso 1 - Vazão Máxima				
Hora	Pressão inicial (mca)	Vazão (L/s)	Perda de pressão na BOT (mca)	Pressão final da rede (mca)
0:00	40	1,44	64,52	0,00
1:00	40	1,25	66,01	0,00
2:00	40	1,20	66,35	0,00
3:00	40	1,20	66,35	0,00
4:00	40	1,25	66,01	0,00

(conclusão)

Caso 1 - Vazão Máxima				
Hora	Pressão inicial (mca)	Vazão (L/s)	Perda de pressão na BOT (mca)	Pressão final da rede (mca)
5:00	40	1,57	63,30	0,00
6:00	40	1,90	60,07	0,00
7:00	40	2,18	56,88	0,00
8:00	40	2,50	52,67	0,00
9:00	40	2,69	50,03	0,00
10:00	40	2,78	48,65	0,00
11:00	40	2,75	49,00	0,00
12:00	40	2,64	50,71	0,00
13:00	40	2,50	52,67	0,00
14:00	40	2,38	54,23	0,00
15:00	40	2,31	55,14	0,00
16:00	40	2,31	55,14	0,00
17:00	40	2,50	52,67	0,00
18:00	40	2,59	51,37	0,00
19:00	40	2,45	53,30	0,00
20:00	40	2,27	55,73	0,00
21:00	40	2,15	57,16	0,00
22:00	40	1,81	61,04	0,00
23:00	40	1,53	63,72	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando a Tabela 8, onde a seleção do equipamento foi feita para um ponto de operação com a vazão mínima da rede, percebe-se que a perda de pressão foi menor do que a anterior, confirmando com a seleção de um equipamento para condições de menor vazão. Porém, ainda assim, a perda de pressão foi elevada para todas as vazões, obtendo-se valores de pressão menores que o estabelecido para o fornecimento de água para a população. Isso indica que a seleção também não pode ser utilizada.

Tabela 8 - Simulação do caso 1 para a seleção com vazão mínima

Caso 1 - Vazão Mínima				
Hora	Pressão inicial (mca)	Vazão (L/s)	Perda de pressão na BOT (mca)	Pressão final da rede (mca)
0:00	40	1,44	39,59	0,41
1:00	40	1,25	40,73	0,00
2:00	40	1,20	41,00	0,00
3:00	40	1,20	41,00	0,00
4:00	40	1,25	40,73	0,00
5:00	40	1,57	38,66	1,34
6:00	40	1,90	36,28	3,72
7:00	40	2,18	33,98	6,02
8:00	40	2,50	31,01	8,99
9:00	40	2,69	29,18	10,82
10:00	40	2,78	28,22	11,78
11:00	40	2,75	28,46	11,54
12:00	40	2,64	29,65	10,35
13:00	40	2,50	31,01	8,99
14:00	40	2,38	32,11	7,89
15:00	40	2,31	32,75	7,25
16:00	40	2,31	32,75	7,25
17:00	40	2,50	31,01	8,99
18:00	40	2,59	30,11	9,89
19:00	40	2,45	31,46	8,54
20:00	40	2,27	33,17	6,83
21:00	40	2,15	34,18	5,82
22:00	40	1,81	36,99	3,01
23:00	40	1,53	38,98	1,02

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a última seleção, utilizando a vazão média como ponto de operação para a seleção da bomba, os resultados estão mostrados na Tabela 9. Da mesma forma que as seleções anteriores, a perda de pressão causada pela BOT é elevada para que a utilização seja possível.

Tabela 9 - Simulação do caso 1 para a seleção com vazão média

Caso 1 - Vazão Média				
Hora	Pressão inicial (mca)	Vazão (L/s)	Perda de pressão na BOT (mca)	Pressão final da rede (mca)
0:00	40	1,44	63,52	0,00
1:00	40	1,25	64,48	0,00
2:00	40	1,20	64,69	0,00
3:00	40	1,20	64,69	0,00
4:00	40	1,25	64,48	0,00
5:00	40	1,57	62,69	0,00
6:00	40	1,90	60,35	0,00
7:00	40	2,18	57,89	0,00
8:00	40	2,50	54,51	0,00
9:00	40	2,69	52,33	0,00
10:00	40	2,78	51,17	0,00
11:00	40	2,75	51,46	0,00
12:00	40	2,64	52,89	0,00
13:00	40	2,50	54,51	0,00
14:00	40	2,38	55,78	0,00
15:00	40	2,31	56,51	0,00
16:00	40	2,31	56,51	0,00
17:00	40	2,50	54,51	0,00
18:00	40	2,59	53,44	0,00
19:00	40	2,45	55,03	0,00
20:00	40	2,27	56,98	0,00
21:00	40	2,15	58,11	0,00
22:00	40	1,81	61,07	0,00
23:00	40	1,53	62,98	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Desta forma, podemos identificar que o método de seleção para este caso não foi efetivo, já que, nas três seleções, a condição de abastecimento não foi atendida. Este fato pode estar ligado à faixa de valores de vazão e altura que a bomba deve operar como turbina, já que o

rendimento apresentado é baixo e estes equipamentos estariam operando longe de seu ponto de melhor eficiência.

Para realizar o cálculo da potência obtida no eixo da BOT, foi usada a Equação (6), apresentada por Fronsina, Buono e Senatore (2017) na seção 2.2. Ela utiliza a altura consumida pela BOT e a vazão, em cada hora, para calcular a potência de eixo disponível na BOT. De acordo com a Tabela 10, é possível observar os valores de potência calculados para cada vazão e cada perda de pressão na rede. Pode perceber-se que as potências geradas na vazão máxima e na vazão média são bastante similares. Isto pode ser explicado pela proximidade dos pontos de operação indicados pelo método de seleção. Já para a seleção com a vazão mínima, como a diminuição de pressão exercida pelo equipamento foi menor, a potência disponível também diminui em relação as outras seleções.

Tabela 10 – Potência disponível no eixo para o caso 1

(continua)

Hora	Potência disponível no eixo (kW)		
	Seleção para vazão máxima	Seleção para vazão mínima	Seleção para vazão média
0:00	0,45	0,28	0,45
1:00	0,40	0,25	0,40
2:00	0,39	0,24	0,38
3:00	0,39	0,24	0,38
4:00	0,40	0,25	0,40
5:00	0,49	0,30	0,48
6:00	0,56	0,34	0,56
7:00	0,61	0,36	0,62
8:00	0,65	0,38	0,67
9:00	0,66	0,38	0,69
10:00	0,66	0,38	0,70
11:00	0,66	0,38	0,70
12:00	0,66	0,38	0,68
13:00	0,65	0,38	0,67
14:00	0,63	0,38	0,65
15:00	0,63	0,37	0,64
16:00	0,63	0,37	0,64

(conclusão)

Potência disponível no eixo (kW)			
Hora	Seleção para vazão máxima	Seleção para vazão mínima	Seleção para vazão média
17:00	0,65	0,38	0,67
18:00	0,65	0,38	0,68
19:00	0,64	0,38	0,66
20:00	0,62	0,37	0,63
21:00	0,60	0,36	0,61
22:00	0,54	0,33	0,54
23:00	0,48	0,29	0,47

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como ainda há a necessidade de um gerador para transformar esta energia disponível em forma de trabalho do eixo em energia elétrica, optou-se por realizar uma seleção básica de um gerador de indução conforme Medeiros (2004), explicado na seção 2.4. Este cálculo foi realizado para apresentar resultados mais próximos da realidade, considerando que haverá perdas em relação à eficiência dos equipamentos. Como pode ser observado na Tabela 11, foi selecionado, para isto, a maior potência gerada durante o dia de operação.

Tabela 11 – Potências obtidas no caso 1

	Seleção para vazão Máxima	Seleção para vazão Mínima	Seleção para vazão Média
Maior potência produzida no dia (kW)	0,66	0,38	0,70
Relação PET/PN	0,98	0,96	0,98
Potência teórica (kW)	0,68	0,40	0,71
Potência do gerador (kW)	0,75	0,55	0,75
Eficiência do gerador, %	80,5	76,8	80,5
Soma da energia produzida em um dia no eixo da BOT (kWh)	13,70	8,17	13,98
Energia Elétrica produzida pelo gerador (kWh)	11,03	6,27	11,25

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir desta seleção, foi aplicada à correção mostrada no método apresentado por Medeiros (2004). Através deste valor, pode ser selecionado, em catálogo, um equipamento mais próximo ao valor obtido. Desta forma, é possível conhecer a potência nominal do gerador para cada seleção e, assim, aplicar a eficiência do equipamento à soma das potências produzidas em um dia de trabalho. Consequentemente, ao se multiplicar a soma das energias produzidas durante o dia pelo eixo da BOT, a eficiência do gerador selecionado se obtém a produção de energia em um dia de operação do equipamento.

4.2 Resultados obtidos para os demais casos

A metodologia apresentada anteriormente no desenvolvimento do primeiro caso, foi aplicada para os dezessete casos restantes. Assim, entende-se que seria desnecessário mostrar todos os resultados obtidos em cada etapa, pois geraria uma alta quantidade de informações. Portanto, nos demais casos, somente serão apresentados os de maior importância para a análise dos dados. Ao contrário do caso exemplo, nas situações em que não é possível utilizar a BOT, a potência produzida foi considerada zero e o dimensionamento do gerador não foi realizado. Além disso, a tolerância para afirmar se o equipamento era aceitável foi de, no mínimo, 18 mca, 2 mca a menos que o estabelecido pela rede. Entende-se, portanto, que este valor não apresenta diferença significativa para os usuários que seriam atendidos pela rede após a BOT. Assim, na Tabela 12 é possível observar os resultados obtidos para as simulações da seleção feita com os dados para a vazão máxima da rede, na Tabela 13 para a seleção com a vazão mínima e na Tabela 14 para seleção utilizando a vazão média.

Observando os resultados mostrados na Tabela 12, percebe-se que o número de seleções onde o equipamento pode ser utilizado é baixo, ocorrendo em somente em 5 dos 18 casos simulados. As demais seleções apresentaram uma diminuição de pressão muito alta, chegando a zerar a pressão na rede após a BOT, por isso não podem ser utilizadas. Ainda, analisando os dados, pode-se perceber que as seleções que podem ser aproveitadas ocorrem em redes onde os equipamentos têm uma eficiência maior. Além disso, pode-se constatar que a pressão apresenta maior influência do que a vazão na geração de energia. Ao observar o caso 16, em comparação com o caso 15, nota-se que a diferença de vazão é maior que a de pressão, mas, ainda assim, não suficiente para superar a potência gerada, inclusive com o rendimento do equipamento no segundo caso sendo maior que o primeiro.

Tabela 12 – Resultados para a seleção utilizando a vazão máxima

Caso	Pressão de entrada (mca)	Pressão de saída (mca)	Vazão máxima da rede (L/s)	Rendimento da BOT	Aplicável?	Menor pressão após BOT (mca)	Energia gerada por dia (kWh)
1	40	20	2,78	50%	Não	0,00	0,00
2	60	20	2,78	51%	Não	0,00	0,00
3	80	20	2,78	30%	Não	0,00	0,00
4	40	20	4,63	50%	Não	0,00	0,00
5	60	20	4,63	58%	Não	0,00	0,00
6	80	20	4,63	37%	Não	0,00	0,00
7	40	20	13,89	44%	Não	0,00	0,00
8	60	20	13,89	41%	Não	0,00	0,00
9	80	20	13,89	48%	Não	0,00	0,00
10	40	20	23,15	53%	Não	3,26	0,00
11	60	20	23,15	48%	Não	0,00	0,00
12	80	20	23,15	76%	Sim	25,80	146,63
13	40	20	37,04	44%	Não	0,00	0,00
14	60	20	37,04	72%	Sim	26,34	138,23
15	80	20	37,04	78%	Sim	28,41	212,55
16	40	20	92,59	80%	Sim	20,90	139,54
17	60	20	92,59	64%	Não	0,00	0,00
18	80	20	92,59	75%	Sim	18,08	599,01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando a Tabela 13, que mostra os resultados obtidos utilizando a vazão mínima, também houve pouco sucesso na seleção dos equipamentos. Em apenas três casos a seleção poderia ser empregada.

Novamente, como o ocorrido com a seleção para a vazão máxima, percebe-se que a eficiência do equipamento deve ser alta para a utilização do equipamento ser possível. Neste caso, somente as seleções onde o equipamento utilizado tem um rendimento maior ou igual a 70% pôde ser utilizado.

Tabela 13 - Resultados para a seleção utilizando vazão mínima

Caso	Pressão Entrada (mca)	Pressão Saída (mca)	Vazão Mínima da rede (l/s)	Rendimento da BOT	Aplicável?	Menor pressão após BOT (mca)	Energia Gerada por dia (kWh)
1	40	20	1,20	50%	Não	0,00	0,00
2	60	20	1,20	24%	Não	0,00	0,00
3	80	20	1,20	20%	Não	0,00	0,00
4	40	20	2,01	45%	Não	0,00	0,00
5	60	20	2,01	43%	Não	0,00	0,00
6	80	20	2,01	25%	Não	0,00	0,00
7	40	20	6,02	54%	Não	13,04	0,00
8	60	20	6,02	36%	Não	0,00	0,00
9	80	20	6,02	45%	Não	0,00	0,00
10	40	20	10,03	59%	Não	12,45	0,00
11	60	20	10,03	50%	Não	0,00	0,00
12	80	20	10,03	62%	Não	0,00	0,00
13	40	20	16,05	35%	Não	0,00	0,00
14	60	20	16,05	62%	Não	0,00	0,00
15	80	20	16,05	56%	Não	0,00	0,00
16	40	20	40,12	70%	Sim	23,53	119,21
17	60	20	40,12	72%	Sim	30,41	89,74
18	80	20	40,12	72%	Sim	32,46	96,31

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como mostrado nos dois últimos casos, a impossibilidade de utilização se repete com os resultados obtidos através da seleção com a vazão média. Como pode se ver na Tabela 14, somente em dois casos a seleção poderia ser utilizada.

Tabela 14 - Resultados para a seleção utilizando vazão média

(continua)

Caso	Pressão de entrada (mca)	Pressão de saída (mca)	Vazão média da rede (l/s)	Rendimento da BOT	Aplicável?	Menor pressão após BOT (mca)	Energia gerada por dia (kWh)
1	40	20	2,09	43%	Não	0,00	0,00
2	60	20	2,09	38%	Não	0,00	0,00

(conclusão)

Caso	Pressão de entrada (mca)	Pressão de saída (mca)	Vazão média da rede (l/s)	Rendimento da BOT	Aplicável?	Menor pressão após BOT (mca)	Energia gerada por dia (kWh)
3	80	20	2,09	26%	Não	0,00	0,00
4	40	20	3,48	58%	Não	0,00	0,00
5	60	20	3,48	49%	Não	0,00	0,00
6	80	20	3,48	35%	Não	0,00	0,00
7	40	20	10,45	56%	Não	3,69	0,00
8	60	20	10,45	48%	Não	0,00	0,00
9	80	20	10,45	62%	Não	0,00	0,00
10	40	20	17,42	39%	Não	0,00	0,00
11	60	20	17,42	54%	Não	0,00	0,00
12	80	20	17,42	56%	Não	0,00	0,00
13	40	20	27,87	54%	Não	8,25	0,00
14	60	20	27,87	50%	Não	0,00	0,00
15	80	20	27,87	77%	Sim	28,02	201,62
16	40	20	69,67	79%	Sim	22,11	123,44
17	60	20	69,67	58%	Não	0,00	0,00
18	80	20	69,67	68%	Não	2,46	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os resultados obtidos, é possível constatar que houve pouco sucesso na utilização do método apresentado. Somente em 6 dos 18 casos a seleção pôde ser utilizada com pelo menos um dos três equipamentos escolhidos. Isto implica em um percentual de 33,33% de efetividade.

Ao avaliar os dados, percebe-se que isto está ligado ao rendimento da BOT, já que, somente bombas que fornecem mais de 70% de rendimento tiveram sucesso no resultado. Isto se deve ao método de cálculo de Giugni, Fontana e Portolano (2009) que, tendo em vista adequar a curva da bomba para operação como turbina, utiliza, diretamente, o rendimento do equipamento nos seus cálculos. Além disso, o método de seleção apresentado por Viana e Nogueira (2002) e Giugni, Fontana e Portolano (2009) indicou, através da sua seleção, equipamentos que operam fora de seus pontos de maior eficiência e que, pela exigência de manter uma pressão mínima na saída do equipamento, não conseguiram satisfazer a condição de abastecimento.

Logo, como o maior problema nesta seleção foi à obtenção de pressões abaixo do necessário na rede, uma alteração no método foi proposta: utilizar somente 50% da altura líquida para os cálculos de dimensionamento das BOTs. Isto implicaria na redução de capacidade dos equipamentos escolhidos, podendo, assim, atender a demanda de fornecimento.

4.3 Resultados obtidos para dimensionamento com metade da altura líquida

Para a adequação do método, foram realizados, novamente, os cálculos de seleção dos equipamentos e as simulações para esta nova condição. O dimensionamento seguiu, agora, a nova padronização de pressão, conforme mostrado na Tabela 15.

Tabela 15 – Adequação da pressão para metade da altura disponível

Caso	Pressão de entrada (mca)	Pressão de saída (mca)	Nova condição de pressão: metade da altura líquida (mca)
1	40	20	10
2	60	20	20
3	80	20	30
4	40	20	10
5	60	20	20
6	80	20	30
7	40	20	10
8	60	20	20
9	80	20	30
10	40	20	10
11	60	20	20
12	80	20	30
13	40	20	10
14	60	20	20
15	80	20	30
16	40	20	10
17	60	20	20
18	80	20	30

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como o passo a passo é o mesmo apresentado anteriormente, apenas os resultados das simulações e, que são de grande importância para a análise, serão apresentados. Na Tabela 16 é possível visualizar os resultados para as bombas selecionadas através do ponto de vazão máxima das redes, na Tabela 17 para BOTs selecionadas através do valor mínimo de vazão e na Tabela 18 para os equipamentos selecionados com a vazão média.

Observando os resultados mostrados na Tabela 16, percebe-se que o número de seleções com possibilidade de utilização aumentou significativamente em relação à seleção anterior, tendo um sucesso em 8 casos dos 18, ficando com aproveitamento de 44%.

Tabela 16 – Resultados para a vazão máxima e 50% da altura líquida

Caso	Pressão de entrada (mca)	Pressão de saída (mca)	Vazão média da rede (l/s)	Rendimento da BOT	Aplicável?	Menor pressão após BOT (mca)	Energia gerada por dia (kWh)
1	40	20	2,78	42%	Não	0,00	0,00
2	60	20	2,78	36%	Não	0,00	0,00
3	80	20	2,78	53%	Sim	19,88	12,66
4	40	20	4,63	63%	Sim	29,90	3,94
5	60	20	4,63	50%	Não	4,24	0,00
6	80	20	4,63	43%	Não	0,00	0,00
7	40	20	13,89	49%	Não	0,00	0,00
8	60	20	13,89	43%	Não	0,00	56,64
9	80	20	13,89	46%	Não	0,00	0,00
10	40	20	23,15	59%	Sim	25,70	23,84
11	60	20	23,15	30%	Não	0,00	0,00
12	80	20	23,15	65%	Sim	37,47	95,75
13	40	20	37,04	63%	Sim	18,72	47,78
14	60	20	37,04	47%	Não	6,38	0,00
15	80	20	37,04	68%	Sim	41,88	122,89
16	40	20	92,59	40%	Não	0,00	0,00
17	60	20	92,59	73%	Sim	33,29	218,46
18	80	20	92,59	74%	Sim	76,11	1,96

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os resultados da Tabela 17, utilizando a vazão mínima, também houve um aumento no sucesso de dimensionamento, ficando com um percentual de utilização de 56%, já que 10 dos 18 casos podem ser utilizados.

Tabela 17 - Resultados para a vazão mínima e 50% da altura líquida

Caso	Pressão de entrada (mca)	Pressão de saída (mca)	Vazão média da rede (l/s)	Rendimento da BOT	Aplicável?	Menor pressão após BOT (mca)	Energia gerada por dia (kWh)
1	40	20	1,20	16%	Não	0,00	0,00
2	60	20	1,20	52%	Sim	21,09	6,10
3	80	20	1,20	33%	Não	0,00	0,00
4	40	20	2,01	55%	Sim	21,56	1,28
5	60	20	2,01	54%	Sim	28,68	4,09
6	80	20	2,01	39%	Não	0,00	0,00
7	40	20	6,02	15%	Não	0,00	0,00
8	60	20	6,02	58%	Sim	31,60	27,77
9	80	20	6,02	48%	Não	0,00	0,00
10	40	20	10,03	72%	Sim	32,02	4,54
11	60	20	10,03	67%	Sim	35,78	34,28
12	80	20	10,03	48%	Sim	21,98	39,87
13	40	20	16,05	54%	Sim	25,07	7,94
14	60	20	16,05	65%	Sim	36,44	22,09
15	80	20	16,05	40%	Não	12,68	0,00
16	40	20	40,12	42%	Não	15,31	0,00
17	60	20	40,12	43%	Não	0,00	0,00
18	80	20	40,12	72%	Sim	43,11	72,95

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a vazão média, onde os resultados são mostrados na Tabela 18, o aumento de possibilidades de utilização também melhorou apresentando 11 dos 18 casos aceitáveis para a utilização, o que significa uma possibilidade de uso de 61% para este método.

Tabela 18 - Resultados para a vazão média e 50% da altura líquida

Caso	Pressão de entrada (mca)	Pressão de saída (mca)	Vazão média da rede (l/s)	Rendimento da BOT	Aplicável?	Menor pressão após BOT (mca)	Energia gerada por dia (kWh)
1	40	20	2,09	49%	Não	11,95	0,00
2	60	20	2,09	43%	Não	0,00	0,00
3	80	20	2,09	37%	Não	0,00	0,00
4	40	20	3,48	30%	Não	0,00	0,00
5	60	20	3,48	57%	Sim	18,69	14,44
6	80	20	3,48	56%	Sim	25,57	19,52
7	40	20	10,45	72%	Sim	30,24	10,59
8	60	20	10,45	66%	Sim	33,36	34,38
9	80	20	10,45	65%	Sim	37,47	60,26
10	40	20	17,42	47%	Não	16,28	0,00
11	60	20	17,42	61%	Sim	31,39	51,99
12	80	20	17,42	36%	Não	0,00	0,00
13	40	20	27,87	62%	Sim	23,80	28,26
14	60	20	27,87	56%	Sim	29,79	74,99
15	80	20	27,87	38%	Não	0,00	0,00
16	40	20	69,67	41%	Sim	26,18	7,05
17	60	20	69,67	79%	Sim	42,11	123,44
18	80	20	69,67	75%	Sim	45,95	66,97

Fonte: Elaborado pelo autor

Em um panorama geral, a diminuição da altura líquida foi efetiva para apresentar uma seleção mais confiável em relação a sua utilização. Foi constatado que somente em um caso não obtivemos sucesso na seleção, o que apresenta uma viabilidade de utilização de 94%. Pode-se perceber, também, que o rendimento mínimo de uma bomba para operar como turbina ficou em 50% após a redução da altura líquida. Este aumento está ligado à uma redução significativa da pressão no dimensionamento dos equipamentos. Com a sua diminuição, equipamentos menores foram selecionados para atuarem como turbina, gerando, assim, um menor nível de pressão na rede, mantendo as condições mínimas aceitáveis para abastecimento. Porém, percebe-se que, em alguns casos, a pressão da rede após a BOT continua bem acima do valor estabelecido. Isto indica a possibilidade de seleção de um equipamento de maior capacidade,

que teria condições de estabelecer uma maior perda de pressão na rede e, assim, gerar mais energia.

4.4 Comparação entre os métodos de seleção

Mesmo havendo poucos casos que apresentam viabilidade de uso considerando a altura líquida, é possível realizar uma comparação entre os dois métodos de seleção. Em relação à potência gerada pelo eixo, pode-se perceber que houve uma queda significativa de produção nos casos que tiveram sucesso de seleção na primeira tentativa. Isto se deve ao menor aproveitamento de potência feito pelas bombas da segunda seleção, pois se considera menor o valor de pressão disponível para o dimensionamento dos equipamentos.

Pode-se observar, também, que, em relação à potência gerada, a pressão na rede é mais importante que a vazão, já que, em diversos casos, a potência obtida em vazões menores e pressões altas foi maior que nos locais de menor pressão e de vazão mais alta.

Em relação às três diferentes vazões propostas para a seleção, pode-se observar que as maiores potências sempre foram obtidas na vazão máxima da rede. Quando esta não fornecia uma seleção utilizável, a vazão média obteve os melhores resultados. A vazão mínima somente é mais indicada para utilização quando nenhuma das outras seleções é viável.

Ao analisar as potências geradas individualmente por cada BOT, o valor parece baixo. Porém, ao avaliar o campo de aplicação e a quantidade de equipamentos que podem ser instalados, este meio de geração de energia se torna interessante. Para efeito de comparação em relação à energia gerada pelos equipamentos, se desenhou o seguinte caso: se uma cidade possuísse todas estas redes de distribuição e instalasse BOTs em cada uma delas, qual seria a quantidade de energia elétrica produzida? Assim, foram escolhidos para cada caso a seleção que apresentou a maior geração de energia elétrica em um dia. Os valores de cada uma são mostrados na Tabela 19, em conjunto com a identificação de qual parâmetro de pressão e de vazão foi utilizado no dimensionamento da bomba. Nota-se que o caso 1, como não apresentou possibilidade de utilização em nenhum dos métodos apresentados, não foi considerado na tabela.

Tabela 19 – Melhores seleções em relação a produção de energia

Caso	Pressão utilizada	Vazão utilizada	Energia gerada em um dia (kWh)
2	50% da Altura Líquida	Vazão Mínima	6,1
3	50% da Altura Líquida	Vazão Máxima	12,66
4	50% da Altura Líquida	Vazão Máxima	3,94
5	50% da Altura Líquida	Vazão Média	14,44
6	50% da Altura Líquida	Vazão Média	19,52
7	50% da Altura Líquida	Vazão Média	10,59
8	50% da Altura Líquida	Vazão Máxima	56,64
9	50% da Altura Líquida	Vazão Média	60,26
10	50% da Altura Líquida	Vazão Máxima	23,84
11	50% da Altura Líquida	Vazão Média	51,99
12	Altura Líquida	Vazão Máxima	146,63
13	50% da Altura Líquida	Vazão Máxima	47,78
14	Altura Líquida	Vazão Máxima	138,23
15	Altura Líquida	Vazão Máxima	212,55
16	Altura Líquida	Vazão Máxima	139,54
17	50% da Altura Líquida	Vazão Máxima	218,46
18	Altura Líquida	Vazão Máxima	599,01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao realizar a soma de todos os casos, chega-se a um valor de 1.762 kWh produzidos em um dia de operação pelos dezessete equipamentos analisados. Para efeitos de comparação, este valor é levemente superior aos 1.650 kWh consumidos pelas bombas submersas instaladas em três poços de captação profunda, que fornecem em torno de 95 L/s, durante 20 horas de operação. Esses equipamentos são responsáveis pela captação de água bruta de uma cidade de, aproximadamente, 45.000 habitantes e que tem cerca de 18.000 economias ativas.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo utilizar os métodos de seleção de bombas já existentes para a escolha e aplicação na operação como turbinas e no teste de viabilidade para aproveitamento em redes de distribuição de água, buscando uma alternativa para a redução de pressão nas linhas de forma mais eficiente, através da utilização da energia dissipada do fluido como uma fonte de energia elétrica limpa. O estudo do método, nesta aplicação, é necessário já que este foi concebido para utilização em rios e correntes de água, portanto, não há a preocupação com o que acontece com o fluido após a utilização da BOT. Para o estudo em redes de água, esses dados são de grande relevância, já que a principal função é o abastecimento da população.

As análises foram realizadas a partir de dados de vazões de redes reais, utilizadas na CORSAN para abastecimento da população, em que é necessário realizar a diminuição de pressão para atendimento dos padrões de serviço. Contudo, para possibilitar a comparação do método, nestes casos distintos, optou-se por utilizar uma padronização em três faixas diferentes de pressão e em três faixas de vazão, buscando, assim, entender as suas reais influências na seleção e utilização das BOTs. Para cada um dos casos, foram então aplicadas as metodologias de seleção já existentes, possibilitando identificar os modelos comerciais ideais de cada situação, bem como prever seu comportamento quando estiver operando como turbina. Com estas informações, as simulações com o emprego destes equipamentos nas redes foram realizadas através do EPANET sendo que os dados obtidos serviram como base para as análises.

Considerando, então, as cento e oito análises realizadas durante a elaboração deste trabalho, pode-se afirmar que o método de seleção se mostrou eficaz a fim de selecionar os equipamentos para a utilização como BOT. Caso implementado, o sistema seria capaz de gerar 1.762 kWh durante um dia de operação. Este valor é levemente superior aos 1.650 kWh utilizados para a captação de água para uma cidade com, aproximadamente, 18.000 economias ativas e próxima de 45.000 habitantes.

Porém, para plena utilização, o método necessita de alguns ajustes. Em relação à pressão utilizada para o dimensionamento do equipamento, propõe-se que o método seja inicialmente seguido, com a adoção da pressão líquida para o dimensionamento. Ao encontrar situações de não utilização, como o descrito em algumas análises deste trabalho, deve-se reduzir a altura gradualmente, até que um valor de seleção esteja disponível. Isto irá garantir que a seleção utilizada aproveite, de melhor forma possível, a pressão do local, levando a uma maior produção de energia. Além disso, é proposto que o método de seleção deva ser utilizado com a vazão

máxima da rede. A justificativa se dá, pois, nestas seleções, foram obtidas as maiores potências geradas pelo equipamento e, ainda, não contribui diretamente com as falhas de seleção causadas pela excessiva diminuição de pressão na rede. Com estas considerações, entende-se que o método é completamente aplicável na seleção de equipamentos para operação como BOT.

Entretanto, cabe ressaltar que há uma incerteza na previsão estabelecida pelo método, já que os coeficientes de ajustes são obtidos experimentalmente. Assim, recomenda-se para a sequência desta pesquisa a confirmação dos dados obtidos durante as simulações com a utilização destes equipamentos de forma prática.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 12218**: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Programa Nacional de Vigilância em Saúde Ambiental relacionada à qualidade da água para consumo humano**. 1. ed. Brasília, DF: 2005. Disponível em: http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/programa_agua_consumo_humano.pdf. Acessado em: 22 ago. 2020.

BUONO, Dario *et al.* Study of a pump as turbine for a hydraulic urban network using a tridimensional CFD modeling methodology. **Energy Procedia**, Roma, v. 82, p. 201-208, 2015.

CHAPALLAZ, J. M.; EICHENBERG, P.; FISCHER, G. **Manual on pumps used as turbines**. 11. ed. Eschborn: Vieweg, 1992.

COMPANHIA RIO-GRANDENSE DE SANEAMENTO (CORSAN). **Manual De Procedimentos Para Projeto E Execução De Parcelamento De Solo**. Porto Alegre: CORSAN, 2016. Disponível em: <https://www.corsan.com.br/upload/arquivos/201607/29113600-manual-de-procedimentos-para-projeto-e-execucao-de-parcelamento-de-solo-rev-03-agosto-2016.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2020.

CUSTÓDIO, Leticia Moreira, *et al.* Utilização de bomba funcionando como turbina operando à frequência variável como alternativa de geração de energia. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [s. l.], v. 7, p. 106-119, 2018. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/57972>. Acesso em 22 ago. 2020.

DAI, Cui, *et al.* Hydraulic Performance Comparison of Centrifugal Pump Operating in Pump and Turbine Modes. **Journal of Thermal Science**, [s. l.], v. 29, p 1594-1605, set. 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11630-020-1236-z>. Acesso em: 22 jan. 2021.

DANTAS, Manoel Nazareno Amorim; MACHADO, Jéssica da Silva. Dimensionamento de rede de distribuição de água para a comunidade rural Chapada de São Miguel em Esperantina-PI. **Revista Científica Semana Acadêmica**, Fortaleza, v. 1, n. 190, fev. 2020. Disponível em <https://semanaacademica.org.br/artigo/dimensionamento-de-rede-de-distribuicao-de-agua-para-comunidade-rural-chapada-de-sao-miguel>. Acesso em: 22 ago. 2020.

DE MARCHIS, M., *et al.* Energy recovery in water distribution networks: implementation of pumps as turbine in a dynamic numerical model. **Procedia Engineering**, Perudía, v. 70, p. 439–448, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814000514>. Acessado em 25. set. 2020.

FILIPINAS. Department of Energy. **Manuals and Guidelines for micro-hydropower development in rural electrification**. Taguig. v. 1, jun. 2009. Disponível em: https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11737046_02.pdf. Acessado em: 17 fev. 2021.

FREITAS, Walmir, *et al.* Análise comparativa entre geradores síncronos e geradores de indução com rotor tipo gaiola de esquilo para aplicação em geração distribuída. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v. 16, n. 3, p. 332–344, jul. 2005. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-17592005000300006&script=sci_abstract&tlng=pt. Acessado em 10 set. 2020.

FRANKLIN ELETRIC. **Tabela de seleção de bombas e motobombas: Schneider Motobombas**. Joinville: Franklin Eletric, 2019. Disponível em: https://schneidermotobombas.blob.core.windows.net/media/264048/schneider_tabela_selecao_01-2020_web.pdf. Acessado em: 13 abr. 2021.

FROSINA, Emma; BUONO, Dario; SENATORE, Adolfo. A performance prediction method for Pumps as Turbines (PAT) using a Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling approach. **Energies**, [s. l.], v. 10, n. 103, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/1/103>. Acessado em: 18 jan. 2021.

GATTULLI, Letícia Vianna; BRANDÃO, Lívio Ciscotto; EDO, Samila Silva Conde. **Recuperação de Energia Hidráulica: uso de bombas que operem como turbinas**. 2018. Projeto Final (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2018.

GIUGNI, M.; FONTANA, N.; PORTOLANO, D. Energy saving policy in water distribution networks. **Renewable Energy and Power Quality Journal**, Valência, v. 1, n. 7, abr. 2009.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/267393420_European_Association_for_the_Development_of_Renewable_Energies_Environment_and_Power_Quality_Energy_saving_policy_in_water_distribution_networks. Acessado em: 05 mar. 2020.

GRAFF, Neimar Marciel. **Análise e dimensionamento de uma rede de abastecimento de água existente em uma localidade rural do município de Arroio do Meio-RS visando sua otimização operacional**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2019. Disponível em: <https://www.univates.br/bdu/handle/10737/2757>. Acessado em: 07 mar. 2021.

GUARABIRA, Gabriela Rangel; AGUIAR, Luiz Bizerra de. Aspectos básicos sobre a máquina assíncrona no uso da geração de energia eólioelétrica. **Cientefico**, Fortaleza, v. 8, n. 38, jul. 2018. Disponível em: <https://cientefico.emnuvens.com.br/cientefico/article/view/394>. Acessado em: 18 mar. 2021.

GUIDI, Jose Marcius Marson. **Análise da variação do consumo de água utilizando dados obtidos por sistemas supervisores remotos**: estudo de caso no município de Franca-SP. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/320708>. Acessado em 07 mar. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101734.pdf>. Acessado em: 22 ago. 2020.

KRAMER, M.; TERHEIDEN, K.; WIEPRECHT, S. Pumps as turbines for efficient energy recovery in water supply networks. **Renewable Energy**, v. 122, p. 17–25, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118300533>. Acessado em: 24 jan. 2021.

MEDEIROS, Daniel de Macedo. **A utilização de bombas operando como turbinas e geradores de indução na geração de energia elétrica**. 2004. Dissertação (Mestrado em

Ciências em Engenharia da Energia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2004.

PUGLIESE, Francesco. **Experimental and Numerical Investigation of Pumps As Turbines in Water Distribution Networks**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programme in Civil Systems Engineering, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, University of Naples Federico II, Naples, 2017.

ROSSMAN, Lewis A. **EPANET 2.0: Manual do Usuário**. 1. ed. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2009.

SILVA, Cleyton Oliveira da. **Modelagem de rede de distribuição de água com ênfase no controle de perdas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

SILVA, L. D. B; GUIMARÃES A. J. A.; CARVALHO D. F. **IT 179: Notas de Aula**. Seropédica: UFRRJ, 2007.

VIANA, Augusto Nelson Carvalho. **Bombas Funcionando como turbinas**. Rio de Janeiro: Synergia; Itajubá: Acta, 2012.

VIANA, Augusto Nelson Carvalho; NOGUEIRA, Fabio José Horta. Bombas de fluxo operando como turbinas - Procedimento de seleção. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Anais Eletrônicos [...]**. Campinas: SciELO Proceedings; 2008; Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100033&script=sci_arttext&tlng=pt. Acessado em: 30 ago. 2020.

WEG. **W22: Catálogo Técnico Mercado Brasil**. Jaraguá do Sul: WEG, 2021. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hb7/h10/WEG-w22-motor-trifasico-50025536-brochure-portuguese-web.pdf>. Acessado em: 11 abr. 2021.